

С. Н. АЛЕКСЕЕВ-МОХОВ,
А. Н. СТОЛЯРОВ, В. Г. КОВАЛИК

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ ДЛЯ ГАЙКОВЕРТОВ

Широко применяемые в настоящее время на сборочных операциях гайковерты имеют пневматический или электрический привод. Последний выполняется на базе обычных асинхронных двигателей повышенной частоты (200 *Гц*) в сочетании с понижающим редуктором. Скорость выходного вала гайковерта колеблется в пределах 30—100 *об/мин*. Существенным недостатком названных типов привода является нестабильность усилия затяжки гаек из-за целого ряда причин: колебания давления воздуха и напряжения сети, изменения параметров асинхронного двигателя вследствие нагрева при работе «на упор» и т. д. Кроме того, встраиваемый многоступенчатый редуктор с большим передаточным числом имеет большие габариты и вес, сложен в изготовлении и ненадежен в эксплуатации. От этих недостатков в значительной степени избавлен гайковерт, имеющий привод от двигателя с катящимся ротором.

Была проведена научно-исследовательская работа по созданию специального электродвигателя с катящимся ротором (ДКР) для привода гайковертов. Для максимального упрощения технологии изготовления, облегчения эксплуатации и ремонта была выбрана наиболее простая конструкция ДКР с трехфазной сосредоточенной обмоткой на статоре с расщепленными полюсами. Такая конструкция позволяет уменьшить момент инерции ротора и связанных с ним подвижных частей, что улучшает динамические свойства электропривода.

При трехфазной системе питания число зубцов статора кратно трем (3, 6, 9, 12 и т. д.), т. е. может быть как четным, так и нечетным. Выбор оптимального числа зубцов при проектировании ДКР с сосредоточенной обмоткой является одним из главных вопросов.

В настоящей статье на основе гармонического анализа кривой индукции в воздушном зазоре при эксцентрическом роторе определяется оптимальное число зубцов ДКР с сосредоточенной трехфазной обмоткой переменного тока на статоре.

Будем считать, что магнитная проницаемость стали статора и ротора бесконечно велика по всем трем осям; ротор гладкий, краевым эффектом пренебрегаем.

Кривая намагничивающей силы (н. с.) в воздушном зазоре под полюсом имеет прямоугольную форму. Независимо от числа зубцов на статоре, она содержит гармоники, не кратные трем. Скорость вращения гармоник порядка $3n - 1$ равна $-\omega$ и порядка $3n - 2$ равна ω , где $n = 1, 2, 3, \dots$; ω — угловая скорость вращения вектора питающего тока.

Каждая гармоника н. с. из-за неравномерного воздушного зазора между статором и ротором создает спектр гармоник индукции. При неподвижном роторе он состоит из гармоник обратного вращения с той же скоростью и неподвижными гармониками, которые образуют униполярный поток [1]. Суммарную индукцию в воздушном зазоре, созданную всеми гармониками н. с. статора, можно записать в следующем виде:

$$B = \frac{\mu_0}{qR} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{mk} a^{|n|} \cos[\omega_k t - \psi_k - (p_k + n)\varphi], \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м;

q, a — параметры преобразования биполярной системы координат в прямоугольную;

$k = 0, 1, 2, 3, \dots$ — порядок гармоники;

$F_{mk}, \omega_k, \psi_k, p_k$ — амплитуда, угловая скорость в эл. град., начальная фаза и число пар полюсов k -ой гармоники;

φ — угловая координата точки, в которой определяется индукция.

За начало отсчета всех углов принята линия минимального зазора.

При $n = 0$ получим главную волну k -ой гармоники индукции, при $n \neq 0$ — высшие гармоники.

Сила тяжения элементарной площадки расточки статора dS к ротору, а следовательно, и ротора к этой площадке равна:

$$dP = \frac{B^2}{2\mu_0} dS. \quad (2)$$

Для ДКР с цилиндрическими ротором и статором длиной l

$$dS = R l d\varphi, \quad (3)$$

где R — радиус расточки статора.

При симметричном роторе эта элементарная сила приложена к его центру. Разложим ее на две составляющие: нормальную, направленную вдоль линии минимального зазора и прижимающую ротор к статору, и тангенциальную, создающую относительно

оси статора на плече e электромагнитный момент. Тангенциальная составляющая силы тяжения равна:

$$P_t = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 \sin \varphi dS. \quad (4)$$

Электромагнитный момент

$$M_{э.м} = P_t e, \quad (5)$$

где e — эксцентриситет.

Введем следующее обозначение:

$$\Delta = \frac{R}{\delta_{с.р}}, \quad (6)$$

где $\delta_{с.р}$ — величина воздушного зазора при концентричном положении ротора в расточке статора.

$$\delta_{с.р} = R - r, \quad (7)$$

где r — радиус ротора.

Если подставить (1), (3), (4) в (5), проинтегрировать и преобразовать полученное выражение с учетом пяти гармоник индукции ($m=5$) от каждой гармоники н. с. ($n=-2; -1; 0; 1; 2$), то формула электромагнитного момента с учетом (6) примет вид:

$$M_{э.м} = \frac{\pi \mu_0 \Delta \varepsilon F^2}{2 (q \Delta)^2} \sum_{m=1}^5 \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{t=0}^m A_m \times \\ \times \{ C_k C_{k+m} \sin [(\omega_{k+m} - \omega_k) t - (\psi_{k+m} - \psi_k)] + \\ + \frac{1}{2} C_i C_{m-i} \sin [(\omega_i + \omega_{m-i}) t - (\psi_i + \psi_{m-i})] \}, \quad (8)$$

где ε — относительный эксцентриситет

$$\varepsilon = \frac{e}{\delta_{с.р}}; \quad (9)$$

A_m — безразмерные величины, зависящие от эксцентриситета

$$C_k = \frac{1}{k} \sin \frac{k \pi \alpha}{z}, \quad (10)$$

где α — коэффициент полюсной дуги

$$\alpha = \frac{b_z}{t_z}; \quad (11)$$

где b_z — ширина зубца по расточке статора;

t_z — зубцовое деление.

Индекс « m » (амплитуда) при н. с. F для краткости опущен.

На рис. 1 в относительных единицах построен максимальный электромагнитный момент $M_{э.м}^*$ в зависимости от относитель-

ного эксцентриситета при коэффициенте полюсной дуги 0,75 для ДКР с различными числами зубцов на статоре. За базовую величину электромагнитного момента принята

$$M_{\text{баз}} = \frac{\pi \mu_0 I \Delta F^2}{2} \quad (12) \quad M_{\text{эм}}^* \text{ max}$$

Как видно из рис. 1, использование ДКР с четным числом зубцов хуже, чем с нечетным. Более того, при определенных соотношениях геометрических размеров электромагнитный момент двигателей с четным числом зубцов может быть равен нулю и даже менять знак.

При анализе зависимости относительного момента ДКР от числа зубцов предполагалось, что н. с. полюсов одинаковые для ДКР с любым числом зубцов. Практически же выполнить такие двигатели в одинаковых габаритах невозможно. Если же принять одинаковой линейную нагрузку, то электромагнитный момент ДКР, имеющих $z \geq 6$, уменьшится в $(z/3)^2$ раз. Однако с уве-

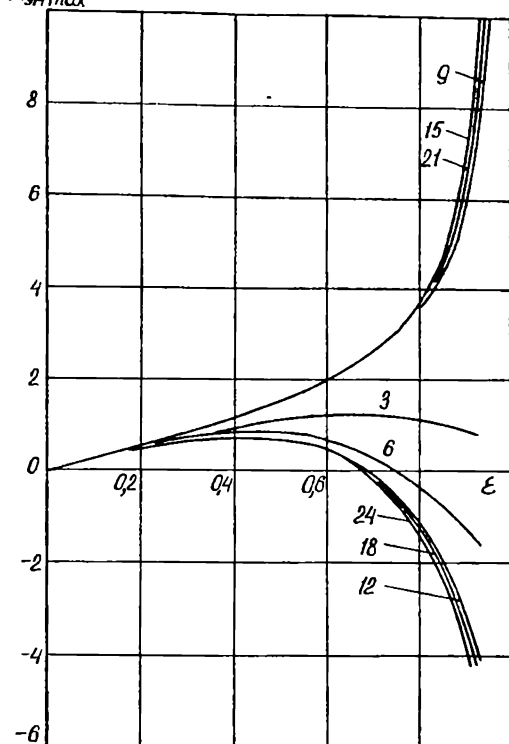


Рис. 1. Зависимость максимального электромагнитного момента от величины относительного эксцентриситета.

личением z уменьшается высота спинки статора и увеличивается площадь паза. Поэтому диаметр расточки статора можно увеличить. При постоянной линейной нагрузке ток фазы увеличится, т. е. электромагнитный момент несколько возрастет. На рис. 2 представлена зависимость максимального электромагнитного момента от эксцентриситета в относительных единицах для ДКР с тремя и девятью зубцами на статоре. Двигатели с большим числом зубцов не имеет смысла сравнивать, так как даже при одинаковых н. с. зубцов моменты их и девятизубцового почти одинаковы. Из рис. 2 видно, что с точки зрения получения максимальных моментов при малых относительных эксцентриситетах $\epsilon \leq 0,8$ сле-

дует применять трехзубцовый статор. При $\epsilon > 0,8$ следует отдавать предпочтение девятизубцовому.

Качественное подтверждение вышеизложенного было получено при испытании ДКР с шестью зубцами на статоре. Двигатель имеет трехфазную сосредоточенную обмотку: по две катушки на каждую фазу. Расчетные данные его следующие:

Радиус расточки статора R , мм	32,5
Средний воздушный зазор $\delta_{\text{ср}}$, мм	0,63
Эксцентриситет e , мм	0,53
Коэффициент полюсной дуги α	0,735
Длина пакета статора l , мм	107

При питании обмоток от сети с частотой 50 гц двигатель развивает максимальный момент 0,7 кгм при напряжении 150 в. Номинальная скорость вращения 42 об/мин. Электромагнитный момент совпадает по направлению с первой гармоникой поля.

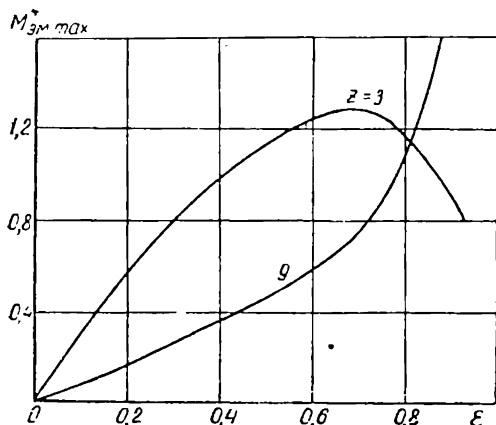


Рис. 2. Зависимость максимального электромагнитного момента от эксцентриситета для ДКР с тремя и девятью зубцами.

ности) имеет ту же номинальную скорость и развивает максимальный момент 2,4 кгм при той же величине тока в обмотках. Зависимости момента стопорения (он равен максимальному моменту в ДКР) и тока статора от напряжения при таком включении статорных обмоток приведены на рис. 4. Кривые 1 и 2 сняты при одинаковых токах в обмотках. Электромагнитный момент при такой схеме включения направлен навстречу вращению первой гармоники поля, что соответствует кривой для трехзубцового статора, приведенной на рис. 1.

При малых значениях напряжения магнитная цепь не насыщена, и при относительном эксцентриситете 0,84 ДКР, включенный по схеме шестизубцового, развивает момент, направленный

Этому режиму соответствует область, лежащая ниже оси абсцисс на рис. 1. Уменьшение или увеличение напряжения приводит к снижению момента (рис. 3), а при напряжении 180 в происходит изменение направления вращения на обратное. Рабочая точка переходит в область выше оси абсцисс на рис. 1.

Этот же двигатель при питании обмоток при схеме трехзубцового статора (зубцы каждой фазы одинаковой полярности)

против первой гармоники поля. Этому режиму соответствует отрицательная область на рис. 1 и 3. С увеличением напряжения увеличивается и момент до тех пор, пока магнитная цепь слабо насыщена. При насыщении как бы увеличивается воздушный зазор, что ведет к увеличению среднего воздушного зазора, а относительный эксцентриситет падает, т. е. рабочая точка на рис. 1 движется с увеличением напряжения по характеристике момента в сторону

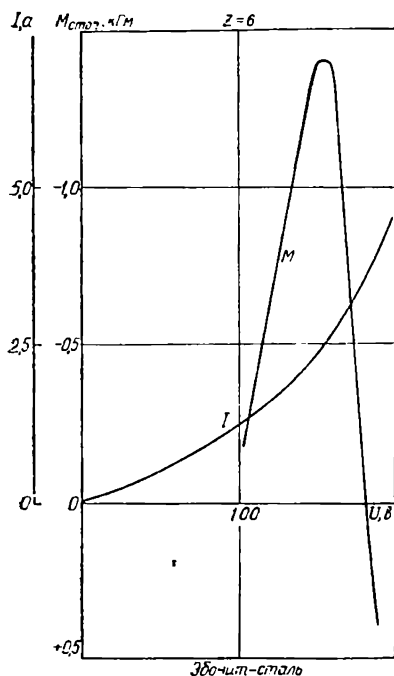


Рис. 3. Зависимость M ; $I=f(U)$

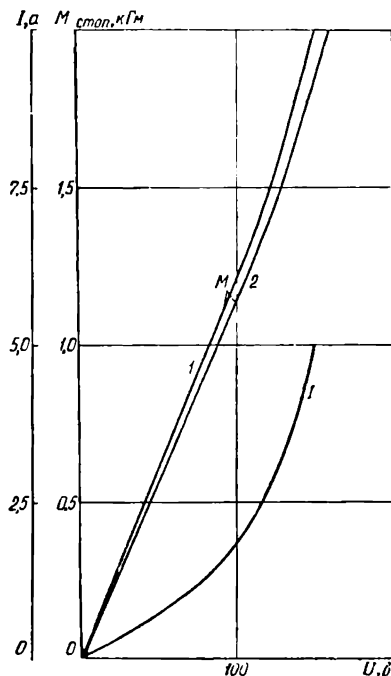


Рис. 4. Зависимость момента стопорения и тока от напряжения: 1 — эбонит — сталь; 2 — резина — сталь.

меньшего эксцентриситета, переходит через ноль и момент вращения меняет знак.

Приведенные на рис. 1 и 2 кривые могут быть использованы при проектировании ДКР с насыщенной магнитной цепью. Как известно, насыщенные стальные участки магнитной цепи можно заменить ненасыщенными и фиктивным воздушным зазором так, чтобы падение магнитного потенциала на реальном и приведенном фиктивном участках были одинаковы. Аналогично реальный ДКР с насыщенной магнитной цепью можно заменить фиктивным приведенным двигателем с ненасыщенной магнитной цепью, но с увеличенным воздушным зазором и, следовательно, с измененными $\delta_{ср}$, e , R [2].

Для расчета насыщенного ДКР нужно определить ϵ и Δ фиктивного ненасыщенного двигателя и воспользоваться упомянутыми кривыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Киклевич. Влияние неравномерного воздушного зазора на характеристики и эксплуатационную надежность асинхронного электродвигателя. «Электричество», 1949, № 12.
 2. Н. F r o h n e. Über den einseitigen magnetischen Zug in Drehfeldmaschinen. Arc. Elektr., 1968, 51, № 5.
-